第48卷 第2期
2025年2月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 48 No. 2
Feb. 2025

基于PLUS模型的艾比湖流域景观生态风险分析及预测

张子涵[1,2]， 王瑾杰[1,2]， 丁建丽[2,3]， 张锦明[1,2]， 葛翔宇[1,2]

（1. 新疆大学地理与遥感科学学院，新疆 乌鲁木齐 830046；2. 新疆大学新疆绿洲生态自治区重点实验室，新疆 乌鲁木齐 830046；3. 新疆理工学院，新疆 阿克苏 843100）

摘 要： 景观生态风险评价是地理学、生态学研究衍生出来的新研究方向，在区域生态环境评价和国土资源规划中具有重要意义。以艾比湖流域为研究区，选取1990、2000、2010年和2020年土地利用遥感解译数据产品，定量分析30 a间土地利用动态变化特征。同时，基于景观风险生态指数，采用地统计学方法，探究艾比湖流域景观生态风险程度及时空分异特征，并利用PLUS模型模拟预测艾比湖流域2030年未来多情景下的土地利用及景观生态风险空间分布格局。结果表明：（1）流域土地利用类型以草地和裸地为主，占总面积70%以上，而灌木和湿地的面积相对较少；1990—2020年农田和不透水地表面积增加幅度明显，草地面积减少，是主要的土地利用转换类型。（2）1990—2020年流域景观生态风险全局Moran's *I*均显著为正，流域景观生态风险持续上升且具有聚集效应，呈"边缘低、中间高"的空间分布规律。（3）所模拟的艾比湖流域2030年不同情景下艾比湖流域景观类型变化趋于平稳，草地和裸地仍然是最主要的土地利用类型。（4）2030年艾比湖流域不同情景下的景观生态风险分布与历史分布相似，综合来看，生态保护情景在社会经济发展的前提下有利于缓解流域景观生态风险，更符合可持续发展的需要。

关 键 词： 土地利用；景观生态风险；PLUS预测；多情景模拟；艾比湖流域

文章编号： 1000－6060(2025)02－0308－15(0308～0322)

生态风险是指因不确定性事故、灾害和人类活动对生态系统产生的影响，损害其结构与功能，从而威胁生态系统安全与健康[1]。生态风险评价可有效衡量生态环境质量，为流域[2-3]、城市[4-5]、自然保护区[6]等的生态环境管理和区域发展提供科学的理论基础和决策依据。在自然和人为因素影响下，景观结构演化加速，生态系统风险增加，对社会与自然生态系统的可持续发展构成严重威胁[7]。景观生态风险评价强调景观格局对特定生态功能或过程的作用，通过对不同景观生态风险等级在时空维度上的变化特征及其地类构成的深入分析与解读[8-9]，可解释和预测生态环境健康程度，揭示生态系统的脆弱性和潜在风险及其时空分布与演变趋势[10]。在已有研究中，国外研究多采用"源–汇"法，侧重单一风险源，难以刻画多重压力下的风险态势；国内多用生态风险指数法，突出风险的时空分异性，更能表征多源风险[10]，康紫薇等[11]基于土地利用数据评价玛纳斯河流域的景观生态风险，解释其时空分异规律；吕乐婷等[12]、郝军等[13]定量分析了细河流域、嫩江流域的土地利用变化及景观生态风险分布格局。以往研究主要聚焦当前或历史阶段[14-16]，未来风险的预测及其防范研究成为当前的研究热点。

而对景观生态风险预测的研究主要基于未来土地利用格局实现，以往研究中，传统模型如CA-Markov[17]、CLUE-S[18]、FLUS[19]等虽应用较为广泛，但在处理多类土地利用斑块变化时缺乏灵活性，精细尺度的模拟受限。例如，CA-Markov模型更关注土地利用的数量变化，适用于大尺度研究，但忽略

收稿日期： 2024-05-26； **修订日期：** 2024-06-11

基金项目： 干旱区水资源高效利用创新团队（2022TSYCTD0001）；国家自然科学基金联合基金重点项目（U2003202）；国家自然科学基金（41961059，42171269）资助

作者简介： 张子涵（2002-），女，硕士研究生，主要从事干旱区生态水文研究. E-mail: 107552301154@stu.xju.edu.cn

通讯作者： 丁建丽（1974-），男，博士，教授，主要从事干旱区遥感与GIS应用研究. E-mail: dingjl@xju.edu.cn

了空间变化及其与环境和社会经济因素的关系；CLUE-S模型侧重空间变化，而忽略了土地利用的数量变化和其他影响因素，不适用于历史和未来的土地利用变化趋势研究[20]。相比之下，PLUS模型在FLUS模型基础上改进，既保留了FLUS对多类别土地利用模拟的灵活性与效率，而PLUS模型凭借集成土地扩张策略分析模块和基于多类随机斑块种子的CA模型，更精准模拟土地利用背后的非线性变化关系，可更好解析用地变化策略[21-23]，更准确揭示未来情境下土地利用和景观生态风险值的对应关系。

艾比湖流域及其以东的天山北坡经济带是新疆乃至西北地区经济发展的重点区域，流域生态环境改善和恶化并存，如何在未来发展情境中，合理利用水土资源，优化土地利用结构以降低生态风险，改善生态质量是关键问题。基于此，本文以新疆艾比湖流域为研究对象，结合LUCC数据和景观生态风险评价方法分析1990—2020年流域土地利用格局变化和景观生态风险的时空演变特征，利用PLUS模型科学预测2030年多情景下的土地利用格局，构建景观生态风险评价指数分析艾比湖流域生态风险时空演变及趋势，以期为区域生态风险防范和土地利用优化提供参考，进而推动区域生态和社会经济可持续的协同发展。

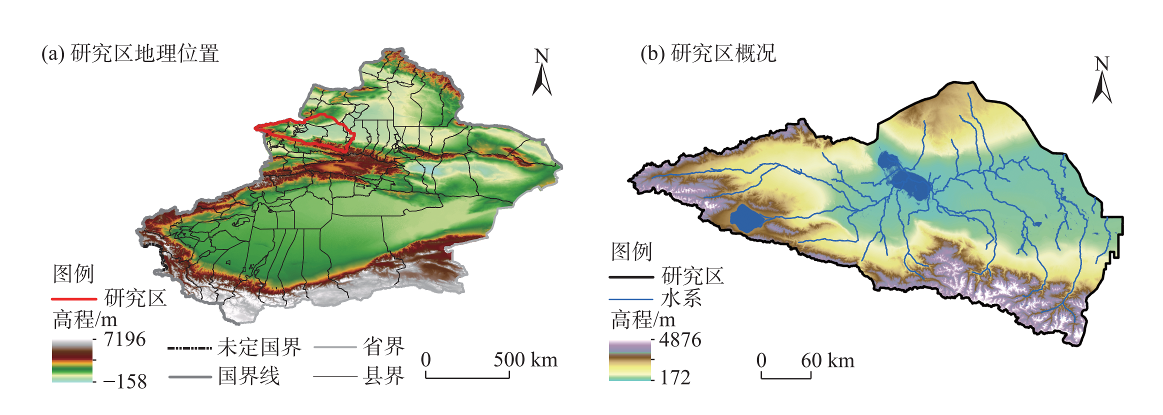
1　数据与方法

1.1　研究区概况

新疆艾比湖流域作为一个山水林田湖草沙生命共同体的典型，是一个相互依存、相互影响的生态系统，在北疆甚至全国影响深远[24]。流域地处欧亚大陆腹地，地理位置介于44°02′~45°23′N，79°53′~83°53′E之间（图1），是“一带一路”沿线的关键节点，也是北疆重要的粮食基地、棉花基地和畜牧业基地。流域主要分布在新疆的西北地区，自然条件恶劣，南、西、北三面环山[25]，中间为谷地平原，因受流域三面环山的独特地形影响，外界气流无法顺利进入该地区，致使流域内气候变化剧烈且十分干燥，蒸散比较大，年均气温7.8 ℃，年降水量181 mm，年均蒸发量1500~3421 mm，最高风速高达55 m·s^{-1}，大风天数可达164 d以上[26]，导致流域内水资源安全以及自然生态系统对气候变化的反应十分敏感。该流域具有典型的干旱区山地-绿洲-荒漠生态环境，为温带干旱区湿地荒漠生态系统，在流域气候调节、维持流域生态系统平衡等方面起着不可替代的作用。

1.2　数据来源

研究所用4期土地利用数据来源于武汉大学黄昕教授团队[27]所制作的中国30 m分辨率年度土地覆盖产品，包括农田、森林、灌木、草地、水域、冰川积雪、裸地、不透水地表、湿地9种土地利用类型。其次，在考虑PLUS模型精确性和基于研究区自然环境与社会经济条件，参考前人的研究[28-31]，以及参照数据的可获性和时效性等因素（表1），分别选取了GDP、人口、年平均气温等13个驱动因子。为保证空间精度一致和PLUS模型的运行，利用ArcGIS 10.8对LUCC数据和驱动因子数据进行裁剪和统一坐标系处理，输出为30 m分辨率的栅格文件，保证行列数一致。



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2024)0650号的标准地图制作，底图边界无修改。

图1　研究区示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the study area

表1 研究数据来源及信息

Tab. 1 Data sources and information of the study

数据类型	数据名称	数据来源
基础数据	土地利用数据	武汉大学黄昕教授团队制作的中国30 m分辨率年度土地覆盖产品,产品整体精度为79.31%(https://zenodo.org/records/4417810)
	行政边界数据	中国科学院资源环境与数据中心(https://www.resdc.cn/)
社会经济数据	人口	Worldpop(https://hub.worldpop.org/)
	GDP	中国科学院资源环境与数据中心(https://www.resdc.cn/)
	距一级道路距离	OpenStreetMap(https://www.openstreetmap.org)
	距二级道路距离	OpenStreetMap(https://www.openstreetmap.org)
	距三级道路距离	OpenStreetMap(https://www.openstreetmap.org)
	距铁路距离	OpenStreetMap(https://www.openstreetmap.org)
	距高速距离	OpenStreetMap(https://www.openstreetmap.org)
气候环境数据	高程	地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)
	坡度	地理空间数据云(https://www.gscloud.cn/)
	年降水量	中国科学院资源环境与数据中心(https://www.resdc.cn/)
	年均气温	中国科学院资源环境与数据中心(https://www.resdc.cn/)
	土壤类型数据	中国科学院资源环境与数据中心(https://www.resdc.cn/)
	NDVI	中国科学院资源环境与数据中心(https://www.resdc.cn/)

注:GDP为国内生产总值;NDVI为归一化植被指数。

1.3 研究方法

1.3.1 景观生态风险指数

(1) 景观生态风险评价单元的划分。本研究使用ArcGIS 10.8创建渔网,将研究区域划分为2026个5 km×5 km的评价单元,并利用Fragstst 4.8软件分别计算各单元的景观生态风险指数值(ERI)。

(2) 景观生态风险指数模型的构建

景观生态风险评价可有效衡量区域生态状况,为可持续的景观规划、设计和生态管理提供支持。研究基于各类土地利用类型面积占比、景观格局指数构建景观生态风险评价模型[32],具体计算公式如下:

$$R_m = \sum_{i=1}^{n} \frac{A_{mi}}{A_m} \left(10 \times E_i \times F_i\right) \quad (1)$$

$$E_i = aC_i + bS_i + cD_i \quad (2)$$

式中:R_m、A_m分别为第m个评价单元的景观生态风险值和面积;A_{mi}为第m个评价单元景观类型i的面积;E_i为景观类型i的干扰度指数,通过景观类型i的破碎度C_i、分离度S_i、优势度D_i加权计算[33]得出;F_i为景观类型i的脆弱度指数;权重$a+b+c=1$,结合前人研究成果[34],将权重a、b、c分别赋值为0.5、0.2、0.3。

根据土地利用分类并结合已有研究成果[35],按土地利用类型脆弱性对各类景观类型进行赋值且归一化处理,获得各类景观脆弱性指数的值如下:不透水地表0.02、森林0.04、灌木0.07、草地0.09、农田0.11、湿地0.13、水域0.16、裸地0.18、冰川积雪0.20。

1.3.2 空间分析方法 土地利用转移矩阵根据同一地区不同时相的土地覆盖现状,形成一个二维矩阵,可全面体现出一个区域土地覆盖类型的数值和转移方向。土地利用动态度可反映区域土地利用变化速率和特征差异[36]。本文采用单一土地利用动态度分析研究期内艾比湖流域景观类型变化情况,计算公式为:

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \times \frac{1}{T} \times 100\% \quad (3)$$

式中:K为某时段内单一景观类型的变化率;U_a、U_b分别为某时段内研究初期、末期景观类型数量;T为研究时段间隔。

1.3.3 空间自相关分析 空间自相关分析方法能够在全局和局部尺度上反映景观生态风险的空间集聚特征[37],而莫兰指数是最常见的用于测算空间自相关的指标,来衡量变量在同一个区域内的观测值之间潜在的相互依赖性,可深入了解空间数据的分布规律和模式。莫兰指数分为全局莫兰指数(Global Moran's I)和局部莫兰指数(Local Moran's I),本文选取局部莫兰指数分析流域景观生态风险空间

聚类效应。公式如下[38]：

$$\text{Local Moran's } I = \frac{n(x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}\sum_{j}^{m} w_{ij}(x_j - \bar{x}) \tag{4}$$

式中：x_i 和 x_j 分别为区域 i 或 j 某现象的指标值（观测值）；$\bar{x}$ 为区域变量的均值；w_{ij} 为空间权重值。若 Local Moran's $I>0$，则表示数据呈空间正相关；若 Local Moran's $I<0$，则表示数据呈空间负相关。

1.3.4 PLUS模型 PLUS模型基于元胞自动机（CA）模型，并引入多类型随机种子机制，通过定义元胞的转换规则，结合适宜性概率图，模拟预测土地利用景观的斑块级演化[39]。其中，LEAS模块通过分析历史土地利用数据和土地扩张的驱动因素，识别出各类用地的变化区域，解析用地之间的深层次关系，结合随机森林算法制定土地扩张的策略。CARS模块为PLUS模型的核心部分，采用CA模拟土地利用景观的斑块级演化，采用基于阈值下降的多类型随机斑块种子机制[40]。通过设置邻域权重、转移矩阵及未来各用地需求数量等相关参数，生成符合实际规律的土地利用空间分布图，并预测未来LUCC空间分布格局。计算公式如下：

$$X_i = \frac{\Delta TA_i - \Delta TA_{min}}{\Delta TA_{max} - \Delta TA_{min}} \tag{5}$$

式中：X_i 为某地类 i 的领域权重参数；ΔTA_i 为研究时段内某地类 TA 的变化量；ΔTA_{max}、ΔTA_{min} 分别为研究时段内 TA 的最大、最小变化量。

2 结果与分析

2.1 土地利用变化分析

基于1990—2020年土地利用类型情况（图2）与各土地利用类型变化（表2~3）分析，流域土地利用以草地、裸地为主，两者面积之和占研究区总面积的70%以上；30 a间农田、森林、水域及不透水地表整体呈增加趋势。其中不透水地表占比虽小，但增长趋势明显，单一动态度高但有逐年下降趋势，从45.15%下降到6.38%，表明在1990—2000年不透水地表虽在人类活动的作用下迅速扩张，但随社会发展，城市建设速度减缓最后趋于稳定趋势；冰川积雪和裸地呈波动下降的趋势分别从1390.90 km^2 和11514.10 km^2 下降到1185.50 km^2 和10384.50 km^2；草地面积稳定下降，占比从61.45%下降到53.27%；此外灌木与湿地面积没有明显变化。

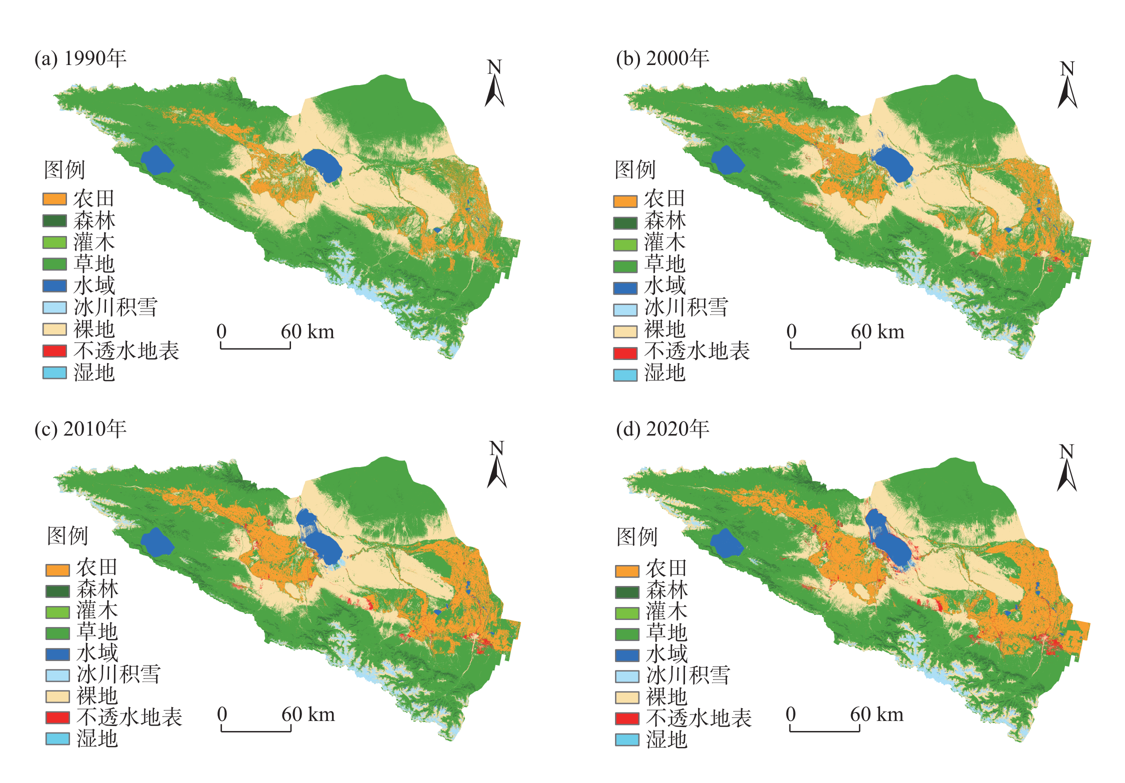


图2 1990—2020年研究区土地利用类型分布

Fig. 2 Distributions of land use types in the study area from 1990 to 2020

表2 1990—2020年艾比湖流域各土地利用类型面积变化

Tab. 2 Changes in the area of land use types in Ebinur Lake Basin from 1990 to 2020

土地利用类型	1990年		2000年		2010年		2020年	
	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%
农田	3709.40	7.83	4678.50	9.87	6384.30	13.47	7383.80	15.58
森林	511.10	1.08	728.00	1.54	897.10	1.89	1039.02	2.19
灌木	0.09	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.05	0.00
草地	29115.40	61.45	27175.50	57.36	26707.50	56.37	25238.50	53.27
水域	1113.40	2.35	1268.30	2.68	1464.00	3.09	1512.10	3.19
冰川积雪	1390.90	2.94	1211.00	2.56	1300.10	2.74	1185.50	2.50
裸地	11514.10	24.30	12177.70	25.70	10238.40	21.61	10384.50	21.92
不透水地表	25.80	0.05	141.20	0.30	388.80	0.82	636.70	1.34
湿地	0.89	0.002	0.86	0.002	0.82	0.002	0.88	0.002

表3 1990—2020年艾比湖流域土地利用类型动态度变化

Tab. 3 Dynamic changes of land use types in Ebinur Lake Basin from 1990 to 2020

土地利用类型	单一土地利用动态度/%			
	1990—2000年	2000—2010年	2010—2020年	1990—2020年
农田	2.61	3.65	1.57	3.30
森林	4.25	2.32	1.58	3.45
灌木	−7.97	−3.13	42.73	−0.89
草地	−0.67	−0.17	−0.55	−0.44
水域	1.39	1.54	0.33	1.19
冰川积雪	−1.29	0.74	−0.88	−0.49
裸地	0.57	−1.59	0.14	−0.33
不透水地表	45.15	17.53	6.38	79.54
湿地	−0.64	−0.49	0.72	−0.15

通过土地利用转移矩阵进一步分析各地类相互转化的关系(图3)。1990—2020年分别有2952.31 km²和1114.45 km²的草地与裸地通过耕地开垦转换为农田,2118.40 km²的裸地被草地覆盖,而草地退化为裸地的面积达到1781.15 km²,同时有529.63 km²的草地转化为森林,不透水地表的显著扩张主要因为草地和裸地的转化。

2.2 流域景观生态风险时空变化分析

为分析各时期景观生态风险情况,直观表示其空间分布,利用ArcGIS 10.8软件普通克里金插值法计算得到各年份景观生态风险指数,根据研究区实际情况,通过自然断点法[11,32]将各年份景观生态风险指数划分为5个生态风险等级,包括低生态风险($ERI \leq 0.04$)、较低生态风险($0.04 < ERI \leq 0.08$)、中等生态风险($0.08 < ERI \leq 0.12$)、较高生态风险区($0.12 < ERI \leq 0.16$)以及高生态风险($ERI > 0.16$)。

由1990—2020年艾比湖流域景观生态风险空间分布(图4)与时空变化分析(图5、表4)可知,1990—2010年艾比湖流域景观生态风险程度持续上升,2010—2020年趋于平稳,以较低和中等生态风险为主,整体表现为低等级向高等级生态风险转移。风险等级升高的区域为1276.63 km²;低生态与中等生态风险区面积呈下降趋势,占比分别从18.76%、22.92%下降到11.94%和16.44%;较低、较高和高生态风险区总体呈上升趋势,较低生态风险区显著增加,面积从15431.70 km²增加到20459.90 km²,占比达43.16%。较高生态风险区和高生态风险区主要集中在裸地,最为明显的是艾比湖西南部裸地开垦为农田,使该地区的景观生态风险降低;而裸地外围的草地不断的退化,使地表裸露,景观脆弱度升高,导致高生态风险区面积的不断扩大。故艾比湖流域的景观生态风险变化主要是由农田扩张等人类活动以及草地退化成裸露地表等因素造成。

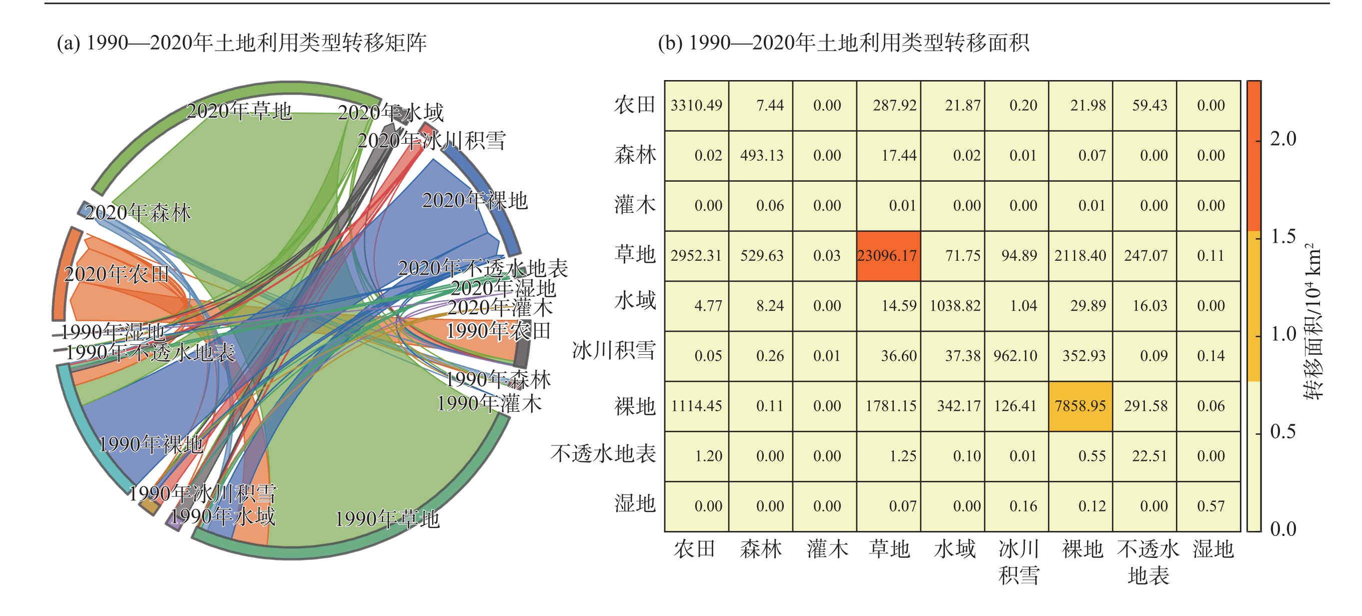


图3　1990—2020年艾比湖流域土地利用转移矩阵

Fig. 3　Land use transition matrix in Ebinur Lake Basin from 1990 to 2020

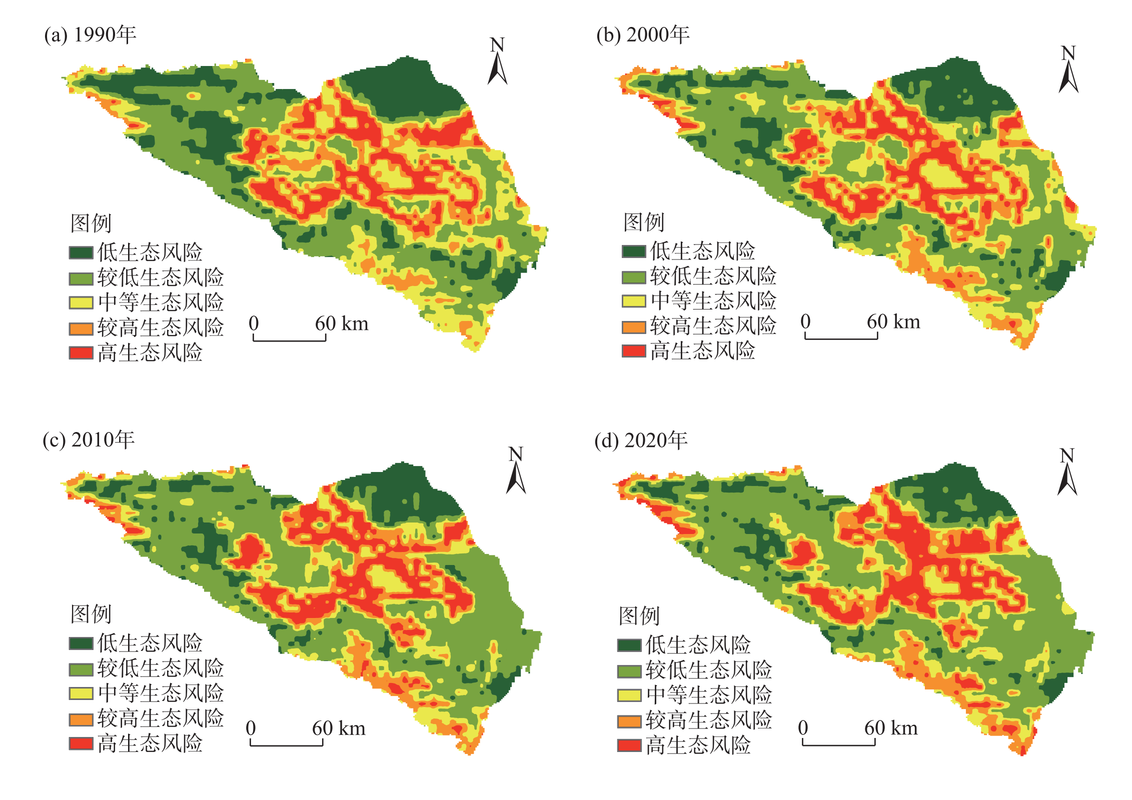


图4　1990—2020年艾比湖流域景观生态风险空间分布

Fig. 4　Spatial distributions of landscape ecological risks in Ebinur Lake Basin from 1990 to 2020

2.3　景观生态风险空间自相关分析

为分析其空间集聚特征，对艾比湖流域景观生态风险进行空间自相关分析，得到1990、2000、2010、2020年的Moran's I分别为0.693、0.657、0.677、0.690（图6），Moran's I>0.5，表明在1990—2020年研究区的景观生态风险存在显著的正相关关系，且具有空间聚集效应。

由景观生态风险的LISA聚类图（图7）可以得出，研究区景观生态风险主要为高-高、低-低聚类，且分布较为集中稳定，而低-高、高-低聚集区分布

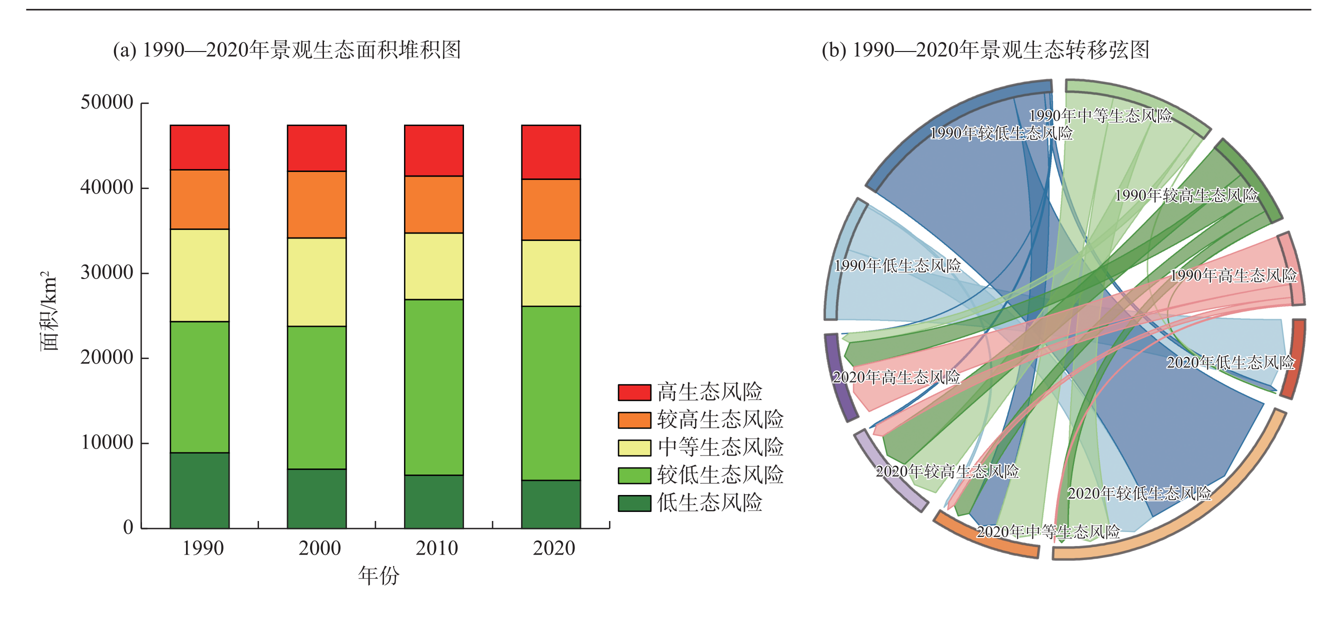


图5 1990—2020年艾比湖流域景观生态风险面积转移

Fig. 5 Landscape ecological risk area transfer in Ebinur Lake Basin from 1990 to 2020

表4 1990—2020年艾比湖流域景观生态风险面积变化

Tab. 4 Changes of landscape ecological risk area in Ebinur Lake Basin from 1990 to 2020

生态风险等级	1990年		2000年		2010年		2020年	
	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%
低生态风险	8892.86	18.76	6970.40	14.71	6261.86	13.21	5659.81	11.94
较低生态风险	15431.70	32.56	16789.40	35.42	20668.50	43.60	20459.90	43.16
中等生态风险	10864.90	22.92	10391.70	21.92	7805.86	16.47	7793.12	16.44
较高生态风险	6997.43	14.76	7851.17	16.56	6700.01	14.13	7172.48	15.13
高生态风险	5213.46	11.00	5397.66	11.39	5964.09	12.58	6315.05	13.32

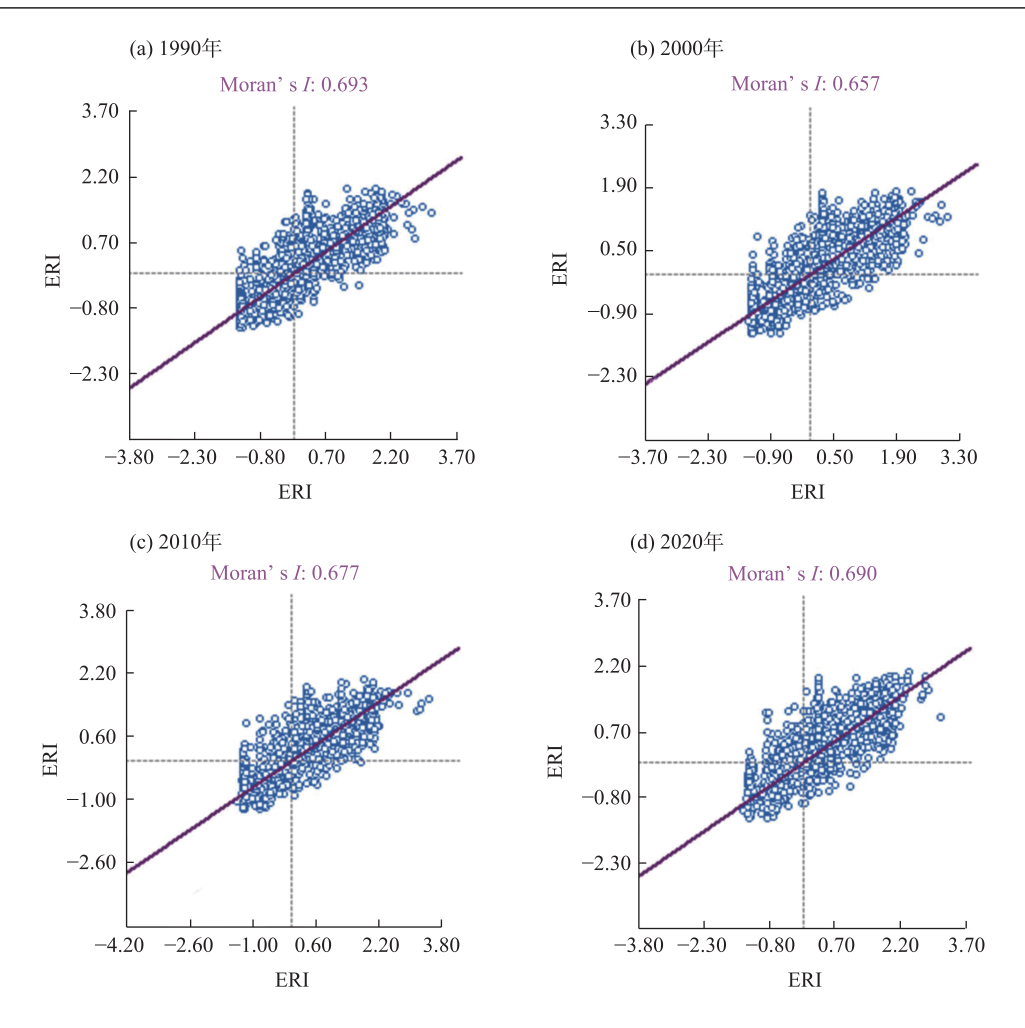
呈现出少而零散分散的特点。高-高聚集区数量没有明显变化,主要分布在以裸地为主要地类的地区,因裸地本身生态稳定性较差,因草地退化,且部分向裸地转换,使得景观优势度降低而景观破碎度升高,使景观生态风险升高。低-低聚集区呈现逐年不断减少的趋势,数量从633减少至550,主要分布在以森林和草地为主的地区,因草地成连片分布,并且较少受人类活动的扰动,景观破碎度低,所以景观生态风险较低。

2.4 基于多情景土地利用模拟的景观生态风险分析

为验证PLUS模型预测精度,通过CARS模块以2000、2010年土地利用数据为基准来预测2020年土地利用格局,将预测结果与实际数据进行对比分析并通过Confusion Matrix and Fom模块精度验证,验证结果显示Kappa系数为0.93,总体精度为0.95,模拟精度较高,模拟结果具有准确性,可用于模拟预测。

为探索不同政策导向下艾比湖流域未来的景观生态风险,不同社会、经济和生态发展路径下的土地利用变化,根据相关学者研究,依据国家高标准农田建设、新疆补充耕地项目以及《博尔塔拉河流域水生态治理规划》设定了4种情景。研究利用模型中的Markov Chain模块生成2030年土地覆被,计算领域权重和设置成本矩阵,模拟出2030年艾比湖流域多情景土地利用数据(图8)。

自然发展情景下,其作为一个基准情景,不考虑其他限制因素及人为干扰,遵循当前自然发展和人类活动规律,仅以Markov Chain预测的2030年各土地利用类型的用地需求进行模拟;对于城镇发展情景,结合已有研究[30],在自然发展情景基础上,设置农田、森林、灌木、草地向不透水地表转移概率增加20%,不透水地表向农田之外的土地利用转移概率降低30%;在生态保护情景下,为更好保护研究区内生态环境,综合考虑《博尔塔拉河流域水生态



注：ERI为景观生态风险指数。下同。

图6　1990—2020年艾比湖流域景观生态风险莫兰指数

Fig. 6　Moran index of landscape ecological risk in Ebinur Lake Basin from 1990 to 2020

治理规划》和已有研究[28-31]，设置将草地向森林的转换概率增加30%，裸地向森林、草地的转换概率增加50%，森林、草地向不透水地表的转换概率降低20%，并严禁生境退化，限制水域和湿地任意转换；耕地保护情景下，通过抑制耕地向其他地类转换和不透水地表的扩张速率来保护耕地，控制非农用地对耕地的占用，限制耕地向其他地类的转换，设置农田向不透水地表用地的转移概率减少60%[40-41]。

艾比湖流域2030年不同情境下的土地利用模拟结果显示：草地和裸地依然是最主要的景观类型。根据2030年艾比湖流域不同情境下土地利用类型面积变化（表5）分析，相较于2020年，自然发展情景下，农田增加866.35 km²，森林增加134.87 km²，草地减少1229.70 km²，不透水地表增加118.55 km²。除生态保护情景外，城镇发展情景和耕地保护情景与自然发展情景相比，各地类变化不明显，说明2030年艾比湖流域景观类型变化趋于平稳。生态保护情景与自然发展情景相比，仅有森林、草地、湿地面积增加，分别增加38.64 km²、1506.60 km²、0.47 km²，而农田和裸地减少最多，分别减少905.99 km²和518.80 km²，不透水地表面积减少了93.57 km²；城镇发展情景相较于自然发展情景，不透水地表面积增加152.11 km²，农田面积减少124.51 km²，草地面积减少12.20 km²；而耕地发展情景与自然发展情景相比，农田面积增加18.66 km²，不透水地表面积减少18.56 km²，结合实际情况，不透水地表减少原因可能源于农村乱占耕地建房得到限制，因此限制耕地转换将使不透水地表面积减少。

计算PLUS模拟的艾比湖流域2030年的土地利用结果，得到不同情景下的景观生态风险分布（图9）。并计算各生态风险分区的面积与2020年进行对比，分析多情景下景观生态风险情况：

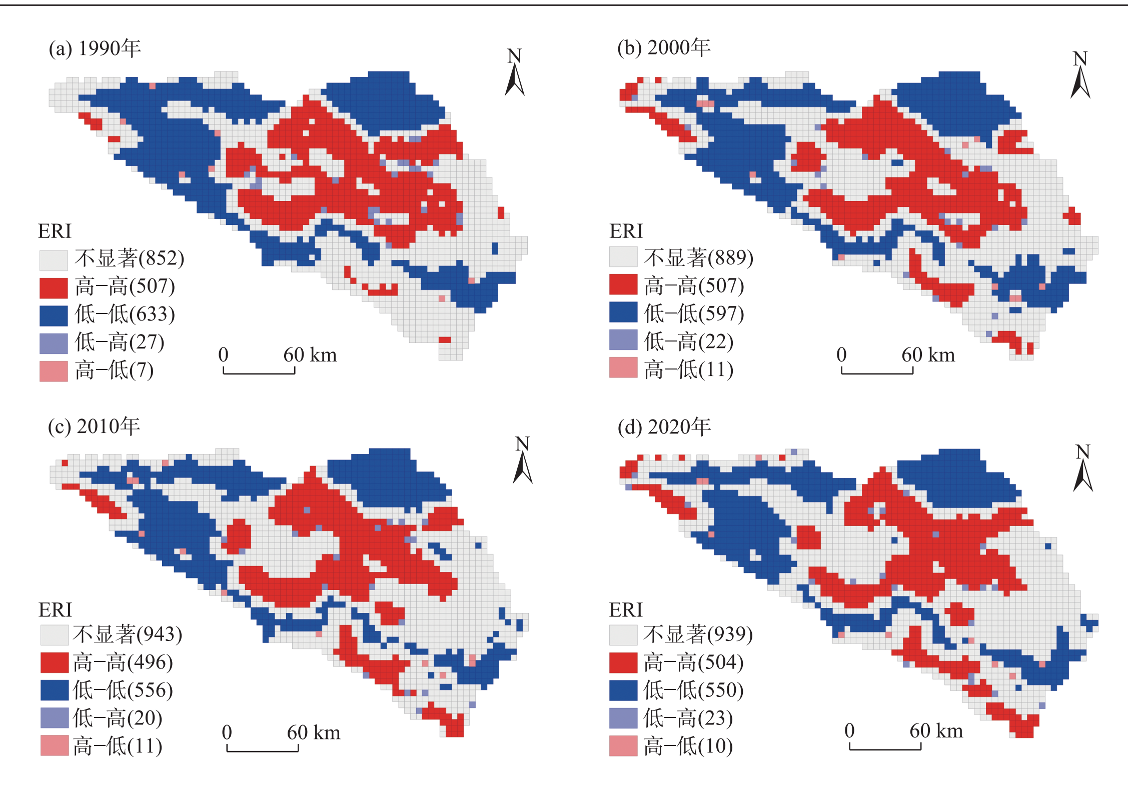


图7 1990—2020年景观生态风险LISA聚类图

Fig. 7 LISA cluster diagrams of landscape ecological risk from 1990 to 2020

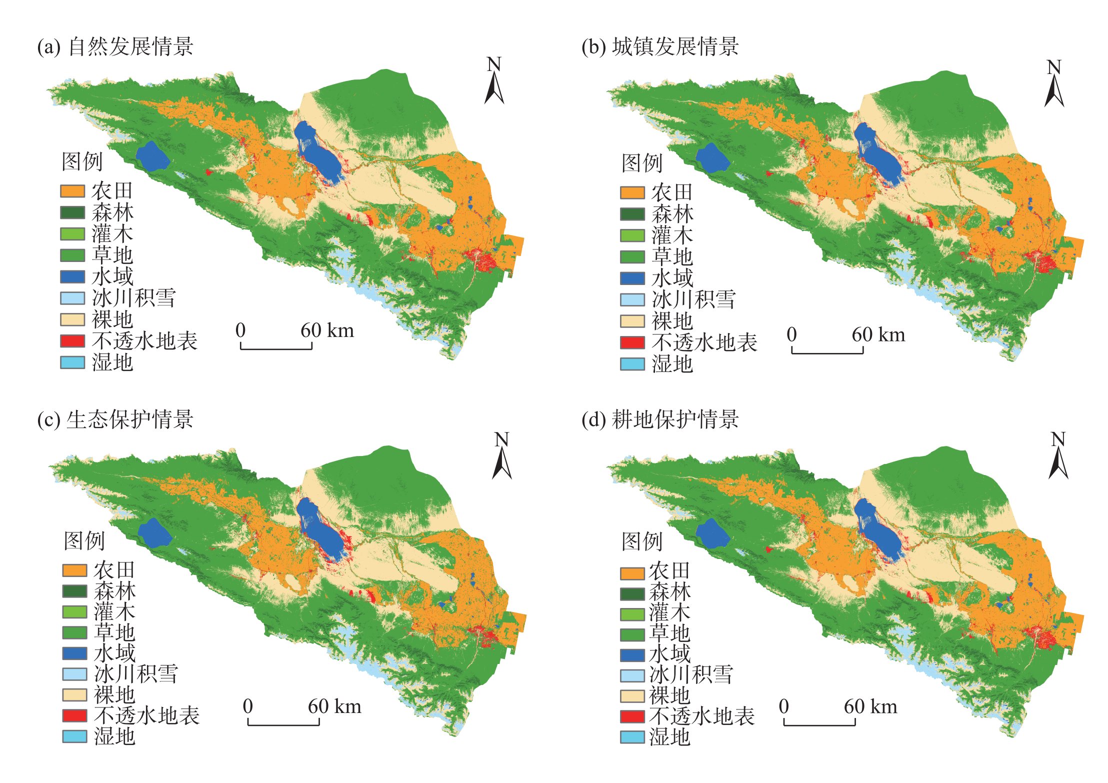


图8 2030年艾比湖流域各情景土地利用类型分布

Fig. 8 Distribution of land use types by scenario in Ebinur Lake Basin in 2030

根据2030年的多情景预测结果，可发现不同情境下的景观生态风险分布与历史分布相似。根据2030年艾比湖流域各情景景观生态风险等级面积（表6）分析可知，自然发展情景相比于2020年，低生

表5　2030年艾比湖流域不同情境下土地利用类型面积变化

Tab. 5　Changes of land use type area in Ebinur Lake Basin under different scenarios in 2030

土地利用类型	自然发展情景		城镇发展情景		生态保护情景		耕地保护情景	
	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%
农田	8250.15	17.41	8125.64	17.15	7344.16	15.50	8268.81	17.45
森林	1173.89	2.48	1173.78	2.48	1212.53	2.56	1173.92	2.48
灌木	0.06	0.00	0.05	0.00	0.05	0.00	0.07	0.00
草地	24008.80	50.67	23996.60	50.65	25515.40	53.85	24010.00	50.67
水域	1555.44	3.28	1555.06	3.28	1550.53	3.27	1555.46	3.28
冰川积雪	1235.62	2.61	1221.42	2.58	1212.16	2.56	1234.31	2.61
裸地	10401.40	21.95	10400.70	21.95	9883.60	20.86	10401.40	21.95
不透水地表	755.25	1.59	907.36	1.92	661.68	1.40	736.69	1.55
湿地	0.42	0.00	0.42	0.00	0.89	0.00	0.37	0.00

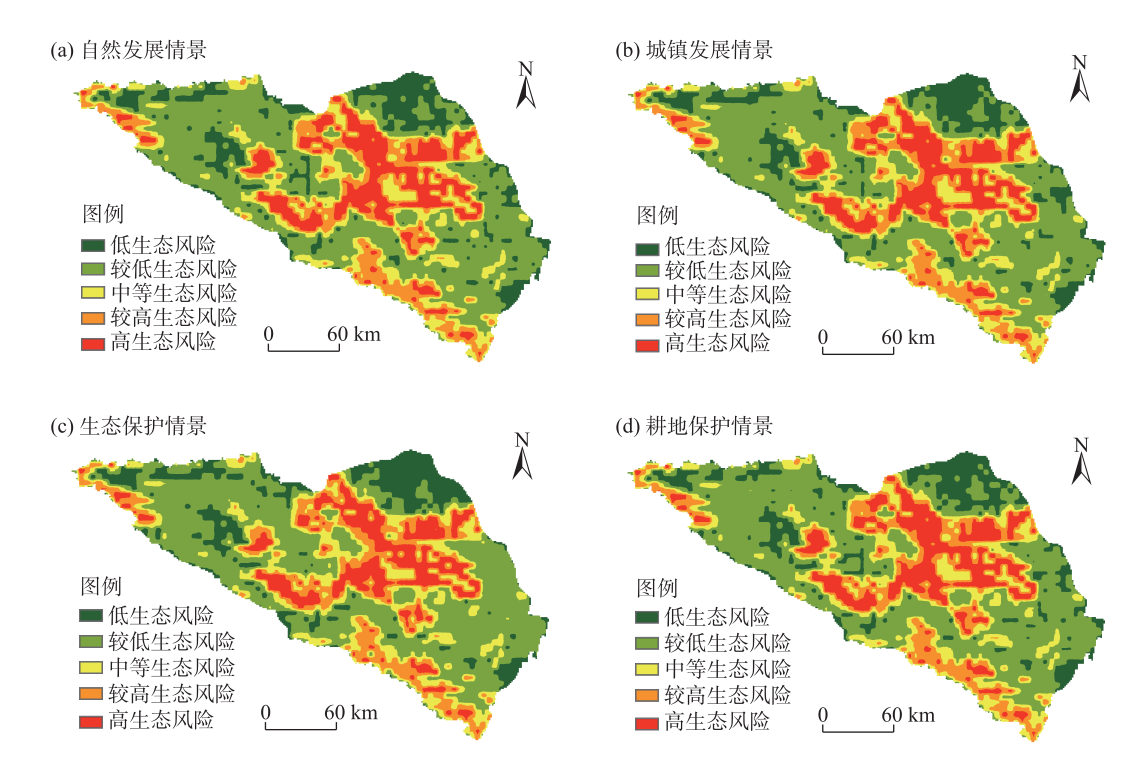


图9　2030年艾比湖流域各情景景观生态风险空间分布

Fig. 9　Spatial distribution of landscape ecological risks in Ebinur Lake Basin in 2030

态风险、较低生态风险面积有所增加，分别增加317.47 km²、405.70 km²，而中等生态风险、较高生态风险和高生态风险区分别减少87.58 km²、388.82 km²、246.78 km²。故在自然发展情境下，模拟结果所得艾比湖流域的景观生态风险整体降低，生态环境呈改善趋势。这可能是由于当地对于生态文明理念的引导和贯彻，使得生态压力减小，风险程度降低。

城镇发展情景下，与自然发展情景相比，低生态风险区面积减少85.75 km²，较低生态风险区增加91.80 km²，中等生态风险区增加92.54 km²，较高生态风险区减少23.86 km²，高生态风险区减少74.70 km²。与自然发展情景相比，低生态风险区和高生态风险区面积都有所减少，地区景观生态风险几乎无变化。

生态保护情景下，低生态风险区增加111.22 km²，较低生态风险区增加40.30 km²，中等生态风险区增加178.18 km²，较高生态风险区增加72.62 km²，高生态风险区减少402.35 km²。低生态风险区面积明显增加，高生态风险区面积大幅度减少。在生态保护情景下，生态环境质量得到改善，生态稳定性有所提高。究其原因是可能基于调水工程，森林、草地

表6 2030年艾比湖流域各情景景观生态风险等级面积

Tab. 6 Landscape ecological risk levels of Ebinur Lake Basin in 2030

生态风险等级	自然发展情景		城镇发展情景		生态保护情景		耕地保护情景	
	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%
低生态风险	5977.28	12.61	5891.53	12.43	6088.50	12.84	5886.65	12.42
较低生态风险	20865.60	43.02	20957.40	44.21	20905.90	44.10	20921.70	44.14
中等生态风险	7705.54	16.26	7798.08	16.45	7883.72	16.63	7745.13	16.34
较高生态风险	6783.66	14.31	6759.80	14.26	6856.28	14.46	6752.29	14.25
高生态风险	6068.27	12.80	5993.57	12.64	5665.92	11.95	6094.58	12.86

等生态效益高的用地增加，不透水地表扩张趋势减缓，增加了其景观优势度、其他景观类型的斑块化所引起的景观破碎度、分离度下降，使得生态环境有所转好。

耕地保护情景下，低生态风险区减少90.63 km²，较低生态风险区增加56.10 km²，中等生态风险区增加39.59 km²，较高生态风险区减少31.37 km²，高生态风险区增加26.31 km²，低生态风险区和较高生态风险区面积略显减少，其余风险区呈小幅度上涨，景观生态风险与其余情景相比，总体略显增加。这可能是由于在开发耕地过程中，存在土地粗放管理的现象，从而导致耕地景观类型碎片化，且使原有生态结构发生变化，使景观脆弱度增加，导致区域景观生态风险程度增加。

从多情景模拟结果来看，各情景的景观生态风险空间格局变化规律一致，到2030年相较于自然发展情景，生态保护情景的景观生态风险呈现降低趋势，城镇发展情景的景观生态风险无明显变化，而耕地保护情景的景观生态风险略显增加。比较上述情景，生态保护情景在兼顾社会发展的同时使得生态环境有一定的改善，注重生态安全格局的优化。

3 讨论

艾比湖流域的土地利用变化及景观生态风险受多种因素共同影响，受自然、经济社会发展用水等影响，20世纪70年代以来入湖水量逐年减少、湖面逐步萎缩[24]，且入湖河流减少。艾比湖水面的急剧萎缩，使得当地植被生存环境恶化，风沙日益严重，草地面积持续减少。且由于西部建设，耕地需求不断增大，经济粗放式发展，受人类活动干扰升高，使得流域景观生态向恶性发展。较为明显的是流域西南部裸地开垦为农田降低了局部风险；但草地退化和地表裸露，使得景观脆弱度升高，导致高生态风险区面积的不断扩大。耕、林、草地和水域的退化以及不透水地表的扩张是区域生态风险升高的主要原因。而土地利用转换如耕地转草地、水域，未利用地转草地等改善了局部生态。所以，“退耕还林还草”也是改善生态的重要手段。

从长时间尺度来看，自然和人为因素都驱动着土地利用变化，虽然人文和社会经济因素是地区土地利用变化的主导因子，但却是建立在自然地理环境基础之上。流域降水量少且分布不均，受水文条件影响大，气候干燥且变化剧烈，而土壤直接影响着土地生产力和土地利用方式，这些自然因素和地理位置直接影响着土地资源的利用。而人口发展、社会经济变化是影响土地利用变化的主要原因，因此选取人口、GDP、道路等作为驱动因素。

研究结果显示1990—2020年艾比湖流域景观生态风险持续上升，与前人研究结论相符[41]。且根据艾比湖流域多情景土地利用格局及景观生态预测结果，表明相比于自然发展情景、耕地保护情景、城镇发展情景，生态保护情境下景观生态风险呈缓解趋势，这同样与许多学者的研究结果一致[39,42]。

根据艾比湖流域景观生态风险时空变化特征，本研究针对加强生态环境保护与降低景观生态风险提出合理化建议：(1) 在流域建设中做好各景观类型规划，基于调水工程及水资源高效利用的背景下，优化土地利用结构，增加景观丰富度、增加林草覆盖度，可实施林灌草综合种植、提高其景观优势度和连通性，降低景观破碎度，提高生态系统的稳定性。(2) 农田的扩张可能会引起森林与草地的退化，导致景观生态风险的提高，所以可规范新农田的开垦扩张以及已开垦农田的管理，保障地区景观生态风险的稳定降低，也有助于农业的可持续发展。(3) 未来发展情景设置应因地制宜、因时制宜，

在实际发展过程中实时调整，加大对艾比湖流域自然生态保护区等重要生态功能区的保护力度，实现经济与生态的可持续发展。(4) 根据城镇发展情景的模拟结果，要严控建设用地的开发，加强城镇周围生态用地的保护和管理。

利用PLUS模型模拟存在一定的主观性，可与其他模型相结合对比，提高结果的可信度和合理性。其次，土地利用变化受多因素影响，可综合考虑更丰富、更全面的驱动因素，综合考量土地利用模拟的模拟体系。

4 结 论

(1) 艾比湖流域土地利用类型以草地和裸地为主，占总面积70%以上，而灌木和湿地的面积相对较少；1990—2020年农田和不透水地表面积增加幅度明显，草地面积减少，是主要的土地利用转换类型。

(2) 1990—2020年艾比湖流域景观生态风险全局Moran's I均显著为正，流域景观生态风险具有聚集效应，呈"边缘低、中间高"的空间分布规律，景观生态风险持续上升后趋于平稳，以较低和中等生态风险为主，整体表现为低等级向高等级生态风险转移。

(3) 所模拟的艾比湖流域2030年不同情景下艾比湖流域景观类型变化趋于平稳，草地和裸地仍然是最主要的土地利用类型。

(4) 2030年艾比湖流域不同情景下的景观生态风险分布与历史分布相似。相较于自然发展情景，生态保护情景景观生态风险呈下降趋势，城镇发展情景生态风险几乎无变化，耕地保护情景生态风险呈上升趋势，综合来看，生态保护情景在社会经济发展的前提下有利于缓解流域景观生态风险，更符合可持续发展的需要。

参考文献(References)

[1] 付在毅, 许学工. 区域生态风险评价[J]. 地球科学进展, 2001, 16(2): 267-271. [Fu Zaiyi, Xu Xuegong. Regional ecological risk assessment[J]. Advances in Earth Science, 2001, 16(2): 267-271.]

[2] Tian P, Li J L, Gong H B, et al. Research on land use changes and ecological risk assessment in Yongjiang River Basin in Zhejiang Province, China[J]. Sustainability, 2019, 1(10): 2817, doi: 10.3390/su11102817.

[3] 莫贵芬, 冯建中, 王中美, 等. 中亚阿姆河跨境流域景观生态风险时空演变特征分析[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(1): 123-131. [Mo Guifen, Feng Jianzhong, Wang Zhongmei, et al. Spatial-temporal evolution characteristics of landscape ecological risk in the transboundary basin of Amu Darya River, Central Asia[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(1): 123-131.]

[4] Huang H, Wang P, Xie H. Ecological risk assessment of land use change in the Poyang Lake eco-economic zone, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2013, 10(1): 328-346.

[5] 汪翡翠, 汪东川, 张利辉, 等. 京津冀城市群土地利用生态风险的时空变化分析[J]. 生态学报, 2018, 38(12): 4307-4316. [Wang Feicui, Wang Dongchuan, Zhang Lihui, et al. Spatiotemporal analysis of the dynamic changes in land use ecological risks in the urban agglomeration of Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): 4307-4316.]

[6] 井云清, 张飞, 陈丽华, 等. 艾比湖湿地土地利用/覆被-景观格局和气候变化的生态环境效应研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(9): 3590-3601. [Jing Yunqing, Zhang Fei, Chen Lihua, et al. Investigation on eco-environmental effects of land use/cover-landscape pattern and climate change in Ebinur Lake Wetland Nature Reserve[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2017, 37(9): 3590-3601.]

[7] Gao L N, Tao F, Liu R R, et al. Multi-scenario simulation and ecological risk analysis of land use based on the PLUS model: A case study of Nanjing[J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 85: 104055, doi: 10.1016/j.scs.2022.104055.

[8] 彭建, 党威雄, 刘焱序, 等. 景观生态风险评价研究进展与展望[J]. 地理学报, 2015, 70(4): 664-677. [Peng Jian, Dang Weixiong, Liu Yanxu, et al. Review on landscape ecological risk assessment[J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(4): 664-677.]

[9] 刘琪. 基于土地利用变化的延河流域景观生态风险评价[D]. 西安: 西北大学, 2016. [Liu Qi. Landscape ecological risk assessment of Yanhe watershed based on land use change[D]. Xi'an: Northwest University, 2016.]

[10] 曹祺文, 张曦文, 马洪坤, 等. 景观生态风险研究进展及基于生态系统服务的评价框架: ESRISK[J]. 地理学报, 2018, 73(5): 843-855. [Cao Qiwen, Zhang Xiwen, Ma Hongkun, et al. Review of landscape ecological risk and an assessment framework based on ecological services ESRISK[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(5): 843-855.]

[11] 康紫薇, 张正勇, 位宏, 等. 基于土地利用变化的玛纳斯河流域景观生态风险评价[J]. 生态学报, 2020, 40(18): 6472-6485. [Kang Ziwei, Zhang Zhengyong, Wei Hong, et al. Landscape ecological risk assessment in Manas River Basin based on land use change[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18): 6472-6485.]

[12] 吕乐婷, 张杰, 孙才志, 等. 基于土地利用变化的细河流域景观生态风险评估[J]. 生态学报, 2018, 38(16): 5952-5960. [Lü Leting, Zhang Jie, Sun Caizhi, et al. Landscape ecological risk assess-

ment of Xi River Basin based on land-use change[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(16): 5952-5960.]

[13] 郝军, 田雅楠, 戈锋, 等. 嫩江中游内蒙古段土地利用与景观生态风险响应关系研究[J]. 中国环境科学, 2023, 43(11): 6132-6140. [Hao Jun, Tian Ya'nan, Ge Feng, et al. Correlational relationship between land use and landscape ecological risks in Inner Mongolia section of middle Nenjiang[J]. China Environmental Science, 2023, 43(11): 6132-6140.]

[14] 陈全通, 殷浩然, 李艳红, 等. 秦巴山地景观生态风险的时空分异[J]. 水土保持通报, 2022, 42(3): 239-246. [Chen Quantong, Yin Haoran, Li Yanhong, et al, Spatial and temporal differentiation of landscape ecological risk in Qinling-Daba Mountains[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(3): 239-246.]

[15] Cui B H, Zhang Y L, Wang Z F, et al. Ecological risk assessment of transboundary region based on land-cover change: A case study of Gandaki River Basin, Himalayas[J]. Land, 2022, 11(5): 638, doi: 10.3390/land11050638.

[16] 高宾, 李小玉, 李志刚, 等. 基于景观格局的锦州湾沿海经济开发区生态风险分析[J]. 生态学报, 2011, 31(12): 3441-3450. [Gao bin, Li Xiaoyu, Li Zhigang, et al. Assessment of ecological risk of coastal economic developing zone in Jinzhou Bay based on landscape pattern[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(12): 3441-3450.]

[17] Hamad R, Balzter H, Kolo K. Predicting land use/land cover changes using a CA-Markov model under two different scenarios[J]. Sustainability, 2018, 10(10): 3421, doi: 10.3390/su10103421.

[18] Peng J, Hu X X, Wang X Y, et al. Simulating the impact of Grain-for-Green Programme on ecosystem services trade-offs in northwestern Yunnan, China[J]. Ecosystem Services, 2019, 39: 100998, doi: 10.1016/j.ecoser.2019.100998.

[19] 王保盛, 廖江福, 祝薇, 等. 基于历史情景的FLUS模型邻域权重设置——以闽三角城市群2030年土地利用模拟为例[J]. 生态学报, 2019, 39(12): 4284-4298. [Wang Baosheng, Liao Jiangfu, Zhu Wei, et al. The weight of neighborhood setting of the FLUS model based on a historical scenario: A case study of land use simulation of urban agglomeration of the Golden Triangle of southern Fujian in 2030[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(12): 4284-4298.]

[20] 周满意, 王承武. 基于PLUS模型的乌鲁木齐市"三生"空间多情景模拟[J]. 中国环境科学, 2024, 44(7): 4021-4030. [Zhou Manyi, Wang Chengwu. Multi-scenario simulation of "production-livelihood-ecological" space in Urumqi based on PLUS[J]. China Environmental Science, 2024, 44(7): 4021-4030.]

[21] Han J Z, Hu Z Q, Wang P J, et al. Spatio-temporal evolution and optimization analysis of ecosystem service value: A case study of coal resource-based city group in Shandong, China[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 363: 132602, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2022.132602.

[22] 杨朔, 苏昊, 赵国平. 基于PLUS模型的城市生态系统服务价值多情景模拟——以汉中市为例[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(10): 86-95. [Yang Shuo, Su Hao, Zhao Guoping. Multi-scenario simulation of urban ecosystem service value based on PLUS model: A case study of Hanzhong City[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(10): 86-95.]

[23] 张艳, 李骏南, 潘博华. 基于PLUS模型的黄河流域生态系统服务评价及多情景预测——以陕西段为例[J]. 干旱区地理, 2024, 47(11): 1935-1946. [Zhang Yan, Li Junnan, Pan Bohua. Evaluation and multi-scenario prediction of ecosystem services in the Yellow River Basin based on PLUS model: A case of Shaanxi section[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(11): 1935-1946.]

[24] 雷小牛, 李宏健, 刘艳红, 等. 新疆艾比湖流域生态环境保护修复治理的基本思路及对策[J]. 水利发展研究, 2023, 23(5): 38-48. [Lei Xiaoniu, Li Hongjian, Liu Yanhong, et al. Basic ideas and measures of ecological environment protection, restoration and governance in Ebinur Lake Basin in Xinjiang[J]. Water Resources Development Research, 2023, 23(5): 38-48.]

[25] 刘景明, 丁建丽, 包青岭, 等. 基于同位素揭示艾比湖流域地下水特征[J]. 干旱区地理, 2023, 46(2): 201-210. [Liu Jingming, Ding Jianli, Bao Qingling, et al. Characteristics of groundwater in Ebinur Lake Basin using isotopes method[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(2): 201-210.]

[26] 丁建丽, 葛翔宇, 王敬哲. 中国艾比湖湿地识别及其时空动态变化[J]. 自然资源学报, 2021, 36(8): 1949-1963. [Ding Jianli, Ge Xiangyu, Wang Jingzhe. Ebinur Lake wetland identification and its spatio-temporal dynamic changes[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(8): 1949-1963.]

[27] Yang J, Huang X. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019[J]. Earth System Science Data, 2021, 13(8): 3907-3925.

[28] 邓晓辉, 王琳, 欧彩虹, 等. 基于PLUS模型的长株潭都市圈景观生态风险动态分析[J]. 地理与地理信息科学, 2024, 40(1): 47-54, 98. [Deng Xiaohui, Wang Lin, Ou Caihong, et al. Dynamic analysis of landscape ecological risk in Changsha, Zhuzhou and Xiangtan Metropolitan Area based on PLUS model[J]. Geography and Geo-information Science, 2024, 40(1): 47-54, 98.]

[29] 张廷, 胡玉柱, 胡海辉, 等. 基于PLUS-InVEST模型的哈尔滨市土地利用及生境质量预测[J]. 环境科学, 2024, 45(8): 4709-4721. [Zhang Ting, Hu Yuzhu, Hu Haihui, et al. Prediction of land use and habitat quality in Harbin City based on the PLUS-InVEST model[J]. Environmental Science, 2024, 45(8): 4709-4721.]

[30] 牛统莉, 熊立华, 陈杰, 等. 基于PLUS模型的长江流域土地利用变化模拟与多情景预测[J]. 武汉大学学报(工学版), 2024, 57(2): 129-141, 151. [Niu Tongli, Xiong Lihua, Chen Jie, et al. Land use simulation and multi-scenario prediction of the Yangtze River Basin based on PLUS model[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2024, 57(2): 129-141, 151.]

[31] 李琛, 高彬嫔, 吴映梅, 等. 基于PLUS模型的山区城镇景观生态风险动态模拟[J]. 浙江农林大学学报, 2022, 39(1): 84-94.

[Li Chen, Gao Binpin, Wu Yingmei, et al. Dynamic simulation of landscape ecological risk in mountain towns based on PLUS model[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2022, 39(1): 84-94.]

[32] 王敏, 胡守庚, 张绪冰, 等. 干旱区绿洲城镇景观生态风险时空变化分析——以张掖绿洲乡镇为例[J]. 生态学报, 2022, 42(14): 5812-5824. [Wang Min, Hu Shougeng, Zhang Xubing, et al. Spatio-temporal evolution of landscape ecological risk in oasis cities and towns of arid area: A case study of Zhangye oasis township [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(14): 5812-5824.]

[33] 尉芳, 刘京, 夏利恒, 等. 基于LUCC的陕西渭北旱塬区景观生态风险评价[J]. 中国环境科学, 2022, 42(4): 1963-1974. [Wei Fang, Liu Jing, Xia Liheng, et al. Landscape ecological risk assessment in Weibei dryland region of Shaanxi Province based on LUCC[J]. China Environmental Science, 2022, 42(4): 1963-1974.]

[34] 张月, 张飞, 周梅, 等. 干旱区内陆艾比湖区域景观生态风险评价及时空分异[J]. 应用生态学报, 2016, 27(1): 233-242. [Zhang Yue, Zhang Fei, Zhou Mei, et al. Landscape ecological risk assessment and its spatio-temporal variations in Ebinur Lake region of inland arid area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(1): 233-242.]

[35] 于航, 刘学录, 赵天明, 等. 基于景观格局的祁连山国家公园景观生态风险评价[J]. 生态科学, 2022, 41(2): 99-107. [Yu Hang, Liu Xuelu, Zhao Tianming, et al. Landscape ecological risk assessment of Qilian Mountain National Park based on landscape pattern[J]. Ecological Science, 2022, 41(2): 99-107.]

[36] Wang S Y, Liu J S, Ma T B. Dynamics and changes in spatial patterns of land use in Yellow River Basin, China[J]. Land Use Policy, 2009, 27(2): 313-323.

[37] 张松林, 张昆. 全局空间自相关Moran指数和G系数对比研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2007, 46(4): 93-97. [Zhang Songlin, Zhang Kun. Comparison between General Moran's index and Getis-Ord General *G* of spatial autocorrelation[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2007, 46(4): 93-97.]

[38] Zhang M X, Bao Y B, Xü J, et al. Ecological security evaluation and ecological regulation approach of East-Liao River Basin based on ecological function area[J]. Ecological Indicators, 2021, 132: 108255, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108255.

[39] 韩楚翘, 郑江华, 王哲, 等. 基于PLUS-InVEST模型吐哈盆地陆地生态系统碳储量时空变化及多情景模拟[J]. 干旱区地理, 2024, 47(2): 260-269. [Han Chuqiao, Zheng Jianghua, Wang Zhe, et al. Spatiotemporal variation and multiscenario simulation of carbon storage in terrestrial ecosystems in the Turpan-Hami Basin based on PLUS-InVEST model[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(2): 260-269.]

[40] 李俊, 杨德宏, 吴锋振, 等. 基于PLUS与InVEST模型的昆明市土地利用变化动态模拟与碳储量评估[J]. 水土保持通报, 2023, 43(1): 378-387. [Li Jun, Yang Dehong, Wu Zhenfeng, et al. Dynamic simulation of land use changes and assessment of carbon storage in Kunming City based on PLUS and InVEST models[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(1): 378-387.]

[41] 杨伶, 王金龙, 周文强. 基于多情景模拟的洞庭湖流域LUCC与生境质量耦合演变分析[J]. 中国环境科学, 2023, 43(2): 863-873. [Yang Ling, Wang Jinlong, Zhou Wenqiang. Coupling evolution analysis of LUCC and habitat quality in Dongting Lake Basin based on multi-scenario simulation[J]. China Environmental Science, 2023, 43(2): 863-873.]

[42] 李晓航, 张飞, 周梅, 等. LUCC视角下的艾比湖流域典型区域景观格局时空变化研究[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(7): 53-58. [Li Xiaohang, Zhang Fei, Zhou Mei, et al. The spatial-temporal dynamic changes of landscape patterns in typical region of Ebinur Lake based on LUCC[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(7): 53-58.]

Analysis and prediction of landscape ecological risk in Ebinur Lake Basin based on PLUS model

ZHANG Zihan[1,2], WANG Jinjie[1,2], DING Jianli[2,3], ZHANG Jinming[1,2], GE Xiangyu[1,2]

(1. College of Geography and Remote Sensing Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China;

2. Key Laboratory of Oasis Ecology, Xinjiang University, Urumqi 830046, Xinjiang, China;

3. Xinjiang Institute of Technology, Aksu 843100, Xinjiang, China)

Abstract: The evaluation of landscape ecological risk is an emerging interdisciplinary field combining geography and ecology, with significant importance for regional environmental assessment and land resource planning. This study focuses on the Ebinur Lake Basin, Xinjiang, China using remote sensing data on land use from 1990, 2000, 2010, and 2020 to quantitatively analyze dynamic land use changes over three decades. The landscape ecological risk index and geostatistical methods were applied to assess the degree and spatiotemporal variation of ecological risks in the basin. Additionally, the PLUS model was used to simulate and predict the spatial distribution of land use and ecological risks under multiple 2030 scenarios. The results revealed the following: (1) Grassland and bare land dominate the basin, covering over 70% of the area, while shrubland and wetlands occupy smaller areas. Between 1990 and 2020, farmland and impervious surfaces expanded significantly, while grassland area shrank, representing the main land use changes. (2) From 1990 to 2020, the global landscape ecological risk, indicated by the Moran index (Moran's *I*), showed a significant positive trend, with risks increasing and exhibiting a clustering effect, following a spatial distribution pattern of "low at the edges, high in the center". (3) By 2030, land use changes in the basin are expected to stabilize, with grassland and bare land remaining dominant. (4) The spatial distribution of ecological risks in 2030 under different scenarios aligns with historical trends. Among these scenarios, the ecological protection scenario is most effective at mitigating risks while balancing socioeconomic development, making it ideal for achieving sustainable development.

Key words: land use; landscape ecological risk; PLUS forecast; multi-scenario simulation; Ebinur Lake Basin